

雅砻江官地水电站生态护坡工程初期土壤肥力状况

吴彬¹, 刘刚^{1,2,3}, 肖海¹, 李铭怡¹, 赵自超¹, 魏科梁¹

(1. 三峡大学 三峡库区地质灾害教育部重点实验室, 湖北 宜昌 443002; 2. 西北农林科技大学 水土保持研究所 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100; 3. 华中农业大学 资源与环境学院, 湖北 武汉 430070)

摘要:以雅砻江官地水电站生态修复工程为例,对种植槽客土回填植草技术(ESS)和植被混凝土基材生态防护技术(CBS)在工程扰动区应用初期的土壤肥力状况进行了研究。通过选取 4 块具有一定代表性的生态恢复边坡样地及一块对照样地,对各样地的土壤肥力相关指标进行了测定,同时应用土壤标准综合级别法分析了土壤肥力的变化。结果表明,4 块修复边坡样地土壤中有机质、全氮、全磷、速效氮、速效磷和速效钾含量均高于对照样地,同时土壤肥力水平亦显著高于对照边坡,其中右岸植被混凝土边坡肥力最高。说明生态护坡技术可有效改善官地水电站工程扰动区的土壤环境,其中以植被混凝土护坡技术效益最为显著。

关键词:官地水电站; 边坡; 生态修复; 土壤肥力

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2014)02-0172-05

中图分类号: S157.1

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2014.02.037

Soil Fertility in Preliminary Stage of Ecological Slope Protection for Guandi Hydropower Station on Yalong River

WU Bin¹, LIU Gang^{1,2,3}, XIAO Hai¹, LI Ming-yi¹, ZHAO Zi-chao¹, WEI Ke-liang¹

(1. Key Laboratory of Geological Hazards in the Three Gorges Reservoir Area of the Ministry of Education, China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, China; 2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. College of Resources and Environment, Huazhong Agricultural University, Wuhan, Hubei 430070, China)

Abstract: Two ecological restoration technologies, i. e., vegetation-growing concrete base material spraying technology(CBS) and the external-soil spray seeding technology(ESS), were applied in ecological restoration area of the Guandi Hydropower Station on the Yalong River to study soil fertility in the preliminary stage of ecological restoration. Six soil fertility indexes were measured by selecting four ecological restoration slopes and one contrast slope. Then the method of standard comprehensive assessment on fertility grade was employed to analyze the variation of soil fertility. Results showed that the contents of soil organic matter, total nitrogen, total phosphorus, available nitrogen, available phosphorus and available kalium on the four ecological restoration slopes were larger than the contrast slope. The soil fertility on the four slopes was also significantly higher than the contrast slope. The slope on right riverbank with CBS applied had the highest soil fertility. Therefore, the two ecological restoration technologies can improve soil quality in the study area, but the benefits of using CBS were better than ESS.

Keywords: Guandi hydropower station; side-slope; ecological restoration; soil fertility

水电站开发在给人们带来巨大经济效益同时,也引发了植被破坏、水土流失等一系列生态环境问题^[1-2],如何恢复受扰植被已成为国内外生态学者关注的焦点^[3]。目前对扰动区进行生态恢复的主要途

径是选用适当的生态防护技术,配以特定的先锋植物种类,经过科学的养护管理,逐渐形成一个新的群落稳定态,最终实现人工植物群落向自然群落演替,形成以本地野生植物为优势种的稳定植物群落^[4]。而

收稿日期:2013-05-16

修回日期:2013-05-30

资助项目:国家自然科学基金项目“稀土元素示踪红壤坡面细沟与细沟间侵蚀演化过程”(41201270);湖北省教育厅自然科学基金项目(Q20111207; XD20100595);黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室基金项目(10501-1211)

作者简介:吴彬(1986—),男(赫哲族),黑龙江省同江市人,硕士研究生,研究方向为边坡防护和生态修复技术。E-mail: wb_heb@126.com。

通信作者:刘刚(1982—),男(汉族),陕西省西安市人,博士,副教授,主要从事水土保持与生态环境研究。E-mail: gliu@foxmail.com。

恢复区的土壤肥力状况直接影响着群落先锋物种的拓殖和更替,甚至在一定程度上决定着植被群落的演替速率和演替方向^[5],是评价生态恢复成效的重要依据。因此,在水电建设扰动区的植被恢复期间进行土壤肥力分析具有十分重要的意义。关于雅砻江流域工程扰动区的植被恢复已有初步报道^[6],然而从土壤肥力角度研究水电站扰动区的植被恢复则鲜有报道。本研究以官地水电站工程扰动区的植被恢复为研究对象,对其恢复初期的土壤肥力状况进行综合评价,以期为水电工程扰动区的植被恢复建设提供技术和理论支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

雅砻江干流全长 1 571 km,天然落差 3 830 m,水力资源丰富,技术可开发容量 3.46×10^7 kW,蕴藏量占四川省全省的 24%。而位于雅砻江干流下游的官地水电站,地处四川省凉山彝族自治州西昌市和盐源县交界处,属川西高原气候区,干、湿季分明。每年 11 月至次年 4 月为干季,5—10 月为雨季,降雨集中,雨季降雨量占全年的 90%~95%,多年平均降水量为 1 077.4 mm。多年平均蒸发量为 1 548.7 mm,相对湿度为 74%。日温差大,电站区域年均气温为 18.6 °C,极端最高气温 39.4 °C、最低 0.5 °C。2008 年水电站开始施工后,形成大量人工开挖边坡,其中用于试验性的生态恢复边坡样地总面积达 7 917 m²,主要使用两种边坡生态修复技术:(1)种植槽客土

回填植草技术(ESS)。该技术是在边坡表面按设计间距打入锚杆,并在坡面外端预留一定的长度,通过预留锚杆段作为载体,在其上构筑钢筋混凝土槽,之后在槽内回填耕植土并种植相应的灌木及爬藤等以达到对坡面进行绿化的效果。该技术可以克服常规绿化中削坡环节所带来的损害,总体上达到综合治理费用的最低化^[7-10]。(2)植被混凝土基材生态防护技术(CBS)。采用特定的混凝土配方和种子配方,对岩石边坡进行防护和绿化的新技术。即先在岩石体上铺上铁丝或塑料网,并用锚钉和锚杆固定;将混凝土原料经搅拌后由常规喷锚设备喷射到岩石坡面,形成近 10 cm 厚度的植被混凝土;之后覆盖一层无纺布防晒保墒,同时水泥可使植被混凝土形成具有一定强度的防护层;经过一段时间洒水养护,青草就会覆盖坡面,揭去无纺布,茂密的青草将自然生长。该技术可以一劳永逸地解决岩坡防护与绿化问题^[11]。

1.2 土样的采集与处理

2008 年水电站进点施工后,形成大量人工开挖边坡,总面积达 1.75×10^5 m²。根据对边坡人工重建植被的实际状况和对其植物群落的分类及分析,按不同的高程和位置,在马道客土回填植草和开挖岩质边坡植被混凝土基材生态护坡技术两种典型植被恢复方式下^[10],选取 4 个代表性试验样地(左岸马道、左岸植被混凝土马道、右岸马道、右岸植被混凝土坡面,涵括实际恢复全貌)和 1 个对照(未经修复的坡地),分别编号 A, B, C, D 和 E。各边坡样地基本情况详见表 1。

表 1 样地基本情况

编号	植被重建方法	坡度/°	面积/m ²	高程/m	坡体类型	初始物种配置	恢复年限/a
A	种植槽客土 回填植草	>75	629	1 241~1 301	喷混凝土边坡	狗牙根、紫花苜蓿、孔雀草、根茎羊茅、白三叶、三角梅、油麻藤、爬山虎	2
B	植被混凝土 基材生态防护	60~75	965	1 235	喷混凝土边坡	狗牙根、紫花苜蓿、根茎羊茅、白三叶、三角梅、油麻藤	2
C	种植槽客土 回填植草	>75	1 347	1 354~1 500	喷混凝土边坡	狗牙根、紫花苜蓿、孔雀草、根茎羊茅、白三叶、三角梅、油麻藤、爬山虎	2
D	植被混凝土 基材生态防护	60~75	4 976	1 447~1 475	喷混凝土边坡	狗牙根、紫花苜蓿、孔雀草、根茎羊茅、白三叶、爬山虎	2
E	无	60~75	879	1 235	喷混凝土边坡	无	—

以季度作为时间单位,从 2009 年第一季度开始对 4 个样地进行取样,直至 2010 年第 4 季度为止,共进行 8 次取样。而取样时,对每个样地用交叉对角线方式分别采取 5 个样点,取样深度为垂直坡面 4~8 cm 处。样品采集后,将土样中的碎石、植物残根等杂物剔除,平铺于厚纸上,摊成约 2 cm 厚的薄层,然后放在干燥通风的地方自然风干。风干土样经研磨后

选择 1 mm 孔径的筛子分筛进行速效养分测定,而全量养分的测定用土则需通过 0.149 mm 孔径的筛子分筛。经充分混匀后,采用四分法从中取出适量样品装入磨口瓶中备用。

各种土壤养分的测定^[12-13]分别为:有机质采用 K₂Cr₂O₇ 容量法—外加热法;全磷采用 NaOH 熔融—钼锑抗比色法;速效磷采用 0.5 mol/L NaHCO₃

溶液浸提—钼锑抗比色法；速效钾采用 1 mol/L 中性 CHCOONH 溶液浸提—火焰光度法；全氮采用浓 H₂SO₄ 消煮—扩散吸收法；速效氮采用扩散吸收法。每个样品重复 3 次，取平均值。

1.3 土壤综合肥力评价方法

土壤肥力问题在很大程度上是土壤有机质的问题。而土壤有机质又是植物矿质营养和有机营养的源泉，本身含有氮、磷、钾、硫等植物所需的各种养分，其中氮、磷、钾则是表征有机质及土壤肥力的 3 大主要元素，均显著影响植物的生长发育^[12]。同时，在生态系统中，有机质和全氮又是表征土壤肥力质量的重要指标^[13]，土壤中有有机质含量的高低也直接影响土壤氮素供应水平，两者具有紧密的正相关关系。所以本研究根据全国土壤普查土壤肥力评价指标分级标准^[12]（表 2），选取有机质、全氮、全磷、速效氮、速效磷和速效钾作为土壤肥力评价因子。这 6 个因子虽然对植被生长都具有较明显的影响，但各因子的影响程度又不尽一致。其中，有机质对土壤的物理结构有重要的作用，所以将其确定为一因子，其它为二因子。

土壤肥力评价分为 3 步完成：首先，根据各个土壤样品实验室测定数据和土壤肥力评价指标分级标准^[12]，确定各项因子的单项级别（ G_i ）；其次，计算全氮、全磷、速效氮、速效磷和速效钾的综合级别，将 5 个养分因子综合为一个因子即养分综合指数（ X_i ），其单项级别等于 5 个养分因子的综合级别；最后，计算出有机质和养分综合指数 2 个因子的综合级别作为土壤的标准综合级别（ G ），从而对土壤肥力做出评价。具体计算方法为：

(1) 单项级别计算公式：

$$G_i = G_{ij} + \frac{B_{ij} - X_i}{B_{ij} - B_{i(j+1)}} \quad (1)$$

式中： i ——参与评价的因子序号； j ——因子的级别序号； G_i ——第 i 个因子的单项级别，为已达到的标准级别； G_{ij} ——已达到级别的标准值； $B_{i(j+1)}$ ——已达到级别的下一级标准值； X_i ——第 i 个因子的实测值。当各肥力因子实测值超过 2 级标准值时，其单项级别均记为 1.0，即各因子对植被生长的贡献已达最佳水平。

表 2 土壤肥力评价指标分级标准

肥力因子 级别	容重/ (g · cm ⁻³)	有机质/ (g · kg ⁻¹)	速效氮/ (mg · kg ⁻¹)	全氮/ (g · kg ⁻¹)	速效钾/ (mg · kg ⁻¹)	速效磷/ (mg · kg ⁻¹)	全磷/ (g · kg ⁻¹)
1	<1.00	>80	>150	>1.50	>160	>20	>1.50
2	≥1.00	≤80	≤150	≤1.50	≤160	≤20	≤1.50
3	≥1.25	≤50	≤100	≤1.00	≤100	≤10	≤1.00
4	≥1.50	≤30	≤50	≤0.75	≤50	≤5.0	≤0.75
5	≥1.70	≤10	≤25	≤0.50	≤30	≤3.0	≤0.50

(2) 各因子的权重（ W_i ）的计算公式：

$$W_i = \frac{X_i}{B_i} (X_i > B_i), \quad W_i = 1 (X_i \leq B_i) \quad (2)$$

式中： X_i ——因子实测值； B_i ——第 i 个因子 5 级划分中标准值的平均值； W_i ——因子权重系数。

(3) 综合级别指数（ G ）通过各因子的权重对单项级别进行加权平均，计算公式为：

$$G = \frac{\sum_{i=1}^n G_i \times W_i}{\sum_{i=1}^n W_i} \quad (3)$$

式中： n ——参与评价的因子数。

1.4 数据处理

数据经 Excel 整理后，采用 SPSS 17.0 统计分析软件进行差异显著性分析，结果经由 Oringin 6.0 软件绘图表示。

2 结果与讨论

2.1 有机质含量分析

从图 1 可以看出，各样地土壤有机质含量以样地

A 最高为 1.86 g/kg，其次为样地 D，为 1.71 g/kg，均显著高于样地 B 和 C，这可能是由于在特定条件下样地植被的生物贡献量相对较大，说明植被的长势也会影响土壤的肥力水平。此外对照样地 E 最低为 1.01 g/kg，均显著低于其它 4 个样地，由此说明这两种生态修复技术均会对土壤有机质含量有所提高。但参照土壤中有有机质含量分级^[14]来看，5 块样地均为极低水平，说明整个恢复区有机质含量还是很贫瘠。其原因一方面由于处在恢复初期，边坡草灌丛凋落物对有机质含量的贡献有限；另一方面由于本底值偏低，在基材配备中，对有机质的添加量较低。

2.2 钾元素含量分析

从图 1 可以看出，各样地土壤速效钾含量以样地 D 最高为 264.27 mg/kg，其次为 B、C 和 A，分别为 260.37、201.48 和 199.64 mg/kg，E 显著低于其它样地为 139.36 mg/kg。D 与 B 样地均显著高于其它 3 个样地，主要也是因为恢复样地的土壤基材中添加了复合肥，对土壤中钾的含量有一定的影响^[15]。

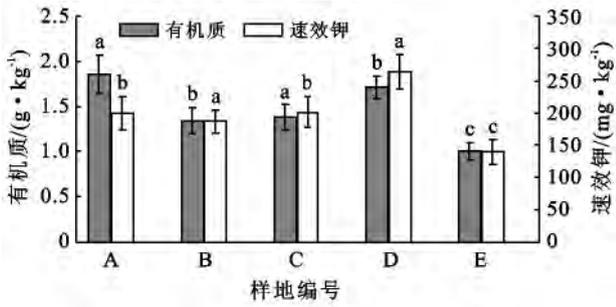


图 1 官地水电站各样地有机质和速效钾含量的比较
注:不同小写字母分别表示同一时期不同样地间该因子在 $p < 0.05$ 水平上差异显著。下同。

2.3 磷元素含量分析

由图 2 可知,各样地土壤全磷含量以样地 D 最高为 1.73 g/kg,其次为 B,C 与 A,分别为 1.67,0.67 和 0.64 g/kg,对对照样地 E 最低,为 0.44 g/kg,D 样地极显著高于其它 4 个样地。各样地速效磷含量(图 2)与全磷表现一致,也是对对照样地 E 最低,仅为 2.70 mg/kg,而样地 D 最高,含量为 71.07 mg/kg,其次是 B,C 和 A 样地,其中样地 B 和 D 极显著高于其它 3 个样地,这主要是因为植被混凝土生态防护技术所使用的土壤基材中使用了含磷量较高的绿化添加剂^[15]。

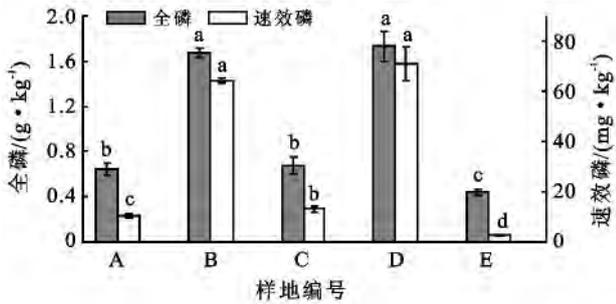


图 2 官地水电站各样地全磷和速效磷含量的比较

2.4 氮元素含量分析

图 3 表明,各样地土壤全氮含量以 A 最高为 0.59 g/kg,其次为样地 C,B 与 D,分别为 0.53,0.47 和 0.44 g/kg,E 最低 0.37 g/kg。A 样地显著高于其它样地,对对照样地则显著低于其它样地,B 和 D 两个样地之间无显著差异。各样地速效氮(图 3)含量与全氮一致,样地 A 最高为 39.22 mg/kg,其次为 C,B,D 和 E 样地,其中样地 E 为 14.73 mg/kg,也均显著低于其它样地。究其原因一方面由于恢复样地的土壤基材中均添加了复合肥,影响氮元素的含量。另一方面,土壤氮素的消长还主要取决于生物积累和分解作用的相对强弱,气候、植被,特别是水热条件,对氮素含量的影响极其显著。

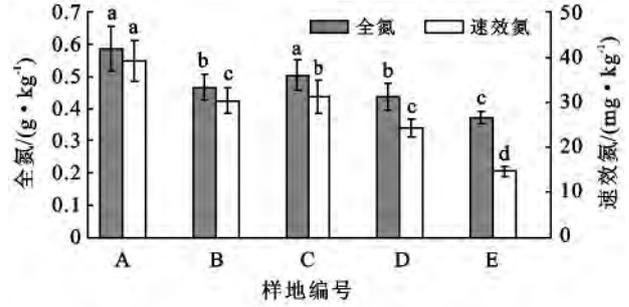


图 3 官地水电站各样地全氮和速效氮含量的比较

2.5 各样地肥力综合评价

由标准综合级别法求出的综合级别指数 G 的大小直接反映了土壤肥力的高低,其肥力综合指数越小,肥力状况就越好,越有利于植被生长。通过图 4 可以看出,官地水电站各样地土壤肥力综合评价级别指数 G 值以右岸植被混凝土护坡技术修复边坡 B 最低为 3.41,其次是 D 为 3.55,两者的指数值均显著低于其它样地,表明其综合肥力较高。对照样地最高,为 4.52,显著高于其它 4 个样地,与其它 4 个样地均存在显著性的差异。A 与 C 样地指数值则介于 E 样地与 B,D 样地之间,与这三组之间均存在显著性差异,而 A 与 C 两个样地之间并无显著性差异。由此表明,两种生态护坡技术特别是植被混凝土护坡技术,均能有效地改善官地水电站工程扰动区的土壤肥力状况,但植被混凝土生态防护技术对土壤肥力的改良效果优于种植槽客土回填植草技术。

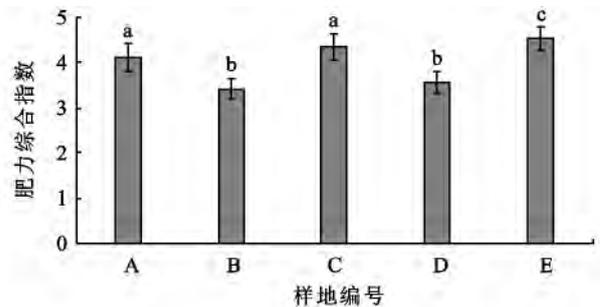


图 4 官地水电站各样地土壤肥力综合评价指标比较

3 结论

选定的 4 块修复边坡样地土壤中有有机质、全氮、全磷、速效氮、速效磷和速效钾含量均高于对照样地,且土壤肥力水平显著高于未经修复的对照边坡,即人工修复技术对于工程扰动区开挖边坡的生态修复以及土壤生态环境的提高有重要作用。而经人工修复的各边坡样地中,以植被混凝土边坡的肥力最高,由此说明植被混凝土护坡技术的修复效果要高于种植槽客土回填植草生态护坡技术。综上所述,生态护坡技

术能有效改善官地水电站工程扰动区的土壤环境,其中以植被混凝土护坡技术的改善效果最佳。

[参 考 文 献]

- [1] 徐旌,陈丽晖. 大型水电站建设的环境影响及生态修复:以云南漫湾水电站为例[J]. 云南环境科学,2005,24(4):14-18.
- [2] 梅朋森,王力,韩京成,等. 水电开发对雅砻江流域生态环境的影响[J]. 三峡大学学报,2009,31(2):8-12.
- [3] 翟海波. 雅砻江锦屏水电站工程区干扰对植被的影响[D]. 重庆:西南大学,2007.
- [4] 彭少麟. 恢复生态学植被重建[J]. 生态科学,1996,15(22):26-31.
- [5] 夏振尧. 向家坝水电站扰动边坡人工植被群落初期演替过程与稳定性研究[D]. 湖北 武汉:武汉大学,2010.
- [6] 魏科梁,夏振尧,夏栋,等. 四川官地水电站工程扰动区植被恢复初期群落特征分析[J]. 福建林业科技,2012,39(2):19-34.
- [7] 王生忠,秦品光. 种植槽工艺法在岩质陡坡生态环境治理中的应用[J]. 西部探矿工程,2008(10):175-177.
- [8] 郜开富,徐文斌. 种植槽技术在高陡边坡生态环境治理中的应用探讨[J]. 探矿工程,2010,37(9):71-73.
- [9] 宋玲,余娜,许文年,等. 植被混凝土护坡绿化技术在高陡边坡生态治理中的应用[J]. 中国水土保持,2009(5):15-16.
- [10] 许文年,夏振尧,戴方喜,等. 恢复生态学理论在岩质边坡绿化工程中的应用[J]. 中国水土保持,2005(4):31-33.
- [11] 章家恩. 生态学常用实验研究方法与技术[M]. 北京:化学工业出版社,2007.
- [12] 潘发明. 森林土壤肥力的综合分析评价[J]. 四川林勘设计,1997(1):32-39.
- [13] Huang Biao, Sun Weixia, Zhao Yongcun, et al. Temporal and spatial variability of soil organic matter and total nitrogen in an agricultural ecosystem as affected by farming practices[J]. Geoderma, 2007, 139(3/4):336-345.
- [14] 许文年,王铁桥,叶建军,等. 岩石边坡护坡绿化技术应用研究[J]. 水利水电技术,2002,33(7):35-36,40.
- [15] 许文年,王铁桥,叶建军,等. 工程边坡绿化技术初探[J]. 三峡大学学报:自然科学版,2001,23(6):512-513.

(上接第 171 页)

- [3] 徐红宁,许嘉琳. 我国砷异常区的成因和分析[J]. 土壤,1996(2):80-84.
- [4] 丁佳红,刘登义,储玲,等. 重金属污染土壤植物修复的研究进展和应用前景[J]. 生物学杂志,2004,21(4):6-10.
- [5] 赵广东,王兵,苏铁成,等. 煤矸石山废弃地不同植物复垦措施及其对土壤化学性质的影响[J]. 中国水土保持科学,2005,3(2):65-69.
- [6] 姚敏,梁成华,杜立宇,等. 沈阳某冶炼厂污染土壤中砷的稳定化研究[J]. 环境科学与技术,2008,31(6):8-11.
- [7] 方凤满,杨丁,王琳琳,等. 芜湖燃煤电厂周边土壤中砷汞的分布特征研究[J]. 水土保持学报,2010,24(1):109-113.
- [8] 田贺忠,曲益萍. 2005 年中国燃煤大气砷排放清单[J]. 环境科学,2009,30(4):956-962.
- [9] 郑刘根,刘桂建,高连芬,等. 中国煤中砷的含量分布,赋存状态,富集及环境意义[J]. 地球学报,2006,27(4):355-366.
- [10] 冯启言,刘桂建. 兖州煤田矸石中的微量有害元素及其对土壤环境的影响[J]. 中国矿业,2002,11(1):67-69.
- [11] 刘桂建,彭子成,王桂梁,等. 煤中微量元素研究进展[J]. 地球科学进展,2002,17(1):53-62.
- [12] 陈静,王学军,朱立军. pH 值和矿物成分对砷在红土中的迁移影响[J]. 环境化学,2003,22(2):121-125.
- [13] 卢爱卿,任守政,石勇,等. 煤中砷的迁移及富集机理[J]. 新疆地质,2001,19(4):309-311.
- [14] Fitz W J, Wenzel W W. Arsenic transformations in the soil-rhizospher-plant system: Fundamentals and potential application to phytoremediation[J]. Journal of Biotechnology, 2002, 99(3):259-278.
- [15] 李东艳,方元元,任玉芬,等. 煤矸石堆周围土壤重金属污染特征分析:以焦作市中马村矿为例[J]. 煤田地质与勘探,2004,32(5):15-17.
- [16] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 3 版. 北京:中国农业出版社,2000.